

锌在作物体内扮演什么“角色”

锌肥能改善人体锌营养和实现作物提质增产

□撰文/祝园园、刘俊杰、黄成东、刘文彪、李玲珊、鲁振亚

锌是植物生长必需的营养元素之一，不仅是植物体内多种酶的组成成分和活化剂，而且参与光合作用，影响植物蛋白质的代谢和生殖器官的发育。目前农业生产上主要通过施用锌肥来提高粮食作物可食用部分的锌含量，以达到改善人体锌营养和实现作物提质增产的双重作用。

目前，锌肥种类很多，除常见的无机锌肥外，还包括合成螯合锌肥、无机络合锌肥及通过新型纳米技术制备的纳米锌肥。这些锌肥都是作为单质锌肥销售与应用，也有一些肥料生产企业在复合肥中添加少量氧化锌生产含锌复合肥。

单质锌肥种类知多少

——无机锌肥。无机锌肥有多种，包括氧化锌、碳酸锌、硫酸锌、氯化锌等，目前最常见的无机锌肥是氧化锌和硫酸锌。氧化锌主要由两种工艺生产，一种是直接通过燃烧金属锌获得，另一种是以一氧化碳和空气还原氧化锌矿石制得。氧化锌属于两性氧化物，具有难溶于水、易溶于酸的特性，在中性和石灰性土壤上的施用效果较差，一般应用于我国的南方酸性土壤，因价格较低、锌含量较高，已成为复合肥中添加锌的最优选择。硫酸锌是以氧化锌为原料与硫酸反应生成的一水合物或七水合物，在价格上略高于氧化锌，具有较高的水溶性，且适宜施用于各类土壤，因此硫酸锌在农业生产中被大面积施用。

无机锌肥主要以土壤施用（土施）和叶面喷施为主。土施无机锌肥在粮食作物和水果、蔬菜上的有效性已得到验证，例如小麦、玉米、水稻土施七水硫酸锌后，平均增产率分别达到了11.3%、13.7%、15.0%，黄瓜、菠菜、西红柿和大蒜的增产率分别达到了21.8%、14%、5.8%和4%。但土施无机锌肥也存在一些局限，有研究表明，在高pH和高碳酸钙含量下，无机锌肥的有效性会受到明显抑制。另外，基于无机锌肥具有养分速效性的特点，在施用量过大时，很有可能短期内对作物产生毒害，影响植株的正常生长；而土壤中被固定的锌，不但无法被作物吸收，还会留在土壤和水体中造成污染。

叶面喷施无机锌肥，养分不需要进入土壤，直接通过气孔进入叶片，避开了复杂的土壤环境，有效提高了作物对锌肥的利用效率，解决了土壤对锌固定带来的不易吸收的问题。大田条件下通过不同时期对夏玉米喷施七水硫酸锌的效果表明，在拔节期和大喇叭口期叶面喷施锌肥后，除产量外，夏玉米籽粒中铜、铁、锌等微量元素的累积量也得到大幅提升，实现了矿质元素营养品质和籽粒产量的同步提高，是强化植物及人体锌营养的合理施用方式。

——合成螯合锌。目前常用的螯合剂为有机化合物乙二胺四乙酸(EDTA)和二乙烯三胺五乙酸(DTPA)。相较于无机锌肥而言，螯合锌肥最主要的特点就是能够有效缓解在石灰性土壤上施用锌时的吸附和固定问题。以Zn-EDTA为例，研究发现，在石灰性土壤中，不论是采用沟

施还是条施方式，施用Zn-EDTA均具有较高的有效锌含量和锌肥利用率，其中锌肥利用率较施用七水硫酸锌的分别提高了2.9%和4.0%。但EDTA等人工合成的螯合剂价格较高，一般用于经济作物。

——有机络合锌。有机络合锌是由无机锌肥与有机络合剂反应生成的，目前最常见的络合剂有木质素磺酸盐(LS)、酚类和聚黄酮类化合物，其中由硫酸锌与LS反应生成的木质素磺酸锌(ZnLS)是最常见的络合物。与合成螯合锌肥相比，ZnLS具有更便宜、更环保的特点，但目前对LS的具体化学结构仍未知，仅推测其可能含有芳香族、脂肪族等疏水基团以及磺酸、羧酸、羧基酚等亲水基团。ZnLS在肥效方面表现出较无机锌肥更好的效果，特别是在无机锌肥易被固定的碱性环境下。在模拟pH为8的水培条件下，施用ZnLS的小麦茎干质量比施用硫酸锌的更高，对玉米的研究也表现出相同的结果。

在盆栽石灰性土壤上的应用效果显示，与施用硫酸锌相比，施用ZnLS的玉米具有更好的长势与生物量，施用2mg/kg的ZnLS与施用20mg/kg的硫酸锌具有相近的生物量。

——纳米锌肥。纳米锌肥最大的特点就是具有比普通锌肥更小的尺寸，普通肥料的粒径一般以毫米计量，而纳米锌肥的粒径为1nm-100nm，农业生产中最常用的纳米锌肥是纳米氧化锌。对比水稻施用纳米锌肥和硫酸锌的效果后发现，在相同锌施用量条件下，纳米锌肥处理的增产效果显著高于硫酸锌处理的，具有更高的有效穗数、穗粒数和结实率，这可能是由于表面效应和小尺寸效应使得纳米锌肥具有更强的吸附性能，施用于土壤后，可以使肥料充分地吸附在根系表面，促进了根系对养分的吸收。

对番茄叶面喷施锌肥后发现，喷施纳米锌肥的番茄产量、果实锌含量、果实糖酸比高于喷施硫酸锌的。这可能是由于叶面喷施时，纳米锌肥具有良好的延展性和表面活性，可以形成一种类金属涂层，长时间留在叶片上，更有利于叶片对锌肥的吸收利用。

但纳米氧化锌对有些作物存在毒性，推测原因可能是由于作物的品种不同，抗毒性能力存在差异；另外，纳米锌肥因粒径小更易被作物吸收，作物对纳米锌肥的施用量可能更加敏感，从而造成作物在低抗毒性及更高的锌吸收量下发生中毒现象。

锌+大量元素让锌发挥更好效果

锌作为微量营养元素，作物对其需求量较少。锌肥单独施用于土壤中一般很难分布均匀，而将锌肥加入大量营养元素肥料中制成含锌复合肥，则是一个节本增效的好方法，一方面减少了单独运输和施用的人力成本，另一方面可利用锌与大量元素的协同作用提高锌肥的有效性。

目前，锌肥主要通过三种方式添加到大量元素肥料中：一是与大量元素肥料颗粒共混；二是在大量元素肥料生产过程中加入；三是涂于大量元素肥料颗粒外层。与大量元素共混是最简便的方法，直接将不同的颗粒肥料进行物理混合，以满足植物的营养需求。

研究发现，氮肥、锌肥单独施用和氮锌肥配施，对冬小麦生育时期吸收锌都有促进作用，但两者配施的效果要优于分别单施的。不过，锌肥较少的用量与大量元素肥料的粒径存在差异的情况下，运输时易出现颗粒离析现象，无法保证施用的均匀性。在造粒过程中加入锌或将锌包裹在大量元素肥料表面则可以改善上述情况，因为它们都成了肥料密不可分的一部分。例如，将

锌均匀地一层一层分布于氮和磷养分中，在等养分施用条件下，水稻施用这种锌复合肥与施用常规肥料相比，能够改善水稻的各种生物性状及作物产量。与施用普通尿素相比，施用含锌尿素增加了玉米对肥料氮的吸收利用，同时促进了氮素从茎叶向籽粒的转运，提高了玉米籽粒氮含量。但这两种添加方式也有缺点，即锌与大量元素肥料的成分会发生反应，降低养分的有效性，特别是与磷肥的反应。

此外，在生产过程中加入锌，其有效性还受加入方式的影响。锌在氨化前加入时，可溶性锌含量显著减少(<10%)；锌在氨化后加入，可溶性锌含量增加了30%；锌在氨化后涂覆于磷肥外部，可溶性锌含量提高了47%。

实践表明，将锌与大量元素制成含锌复合肥后，可以利用锌与大量元素的协同作用实现比单施更好的效果，但由于锌用量较少，锌不易与大量元素肥料制成掺混肥，与大量元素肥料共同造粒又可能引起养分间发生反应降低肥效，因此应不断创新复合肥中锌的添加工艺，最大程度地解决肥料养分退化的问题。

如何解决锌肥存在的问题

锌肥施用对改善作物生长、促进作物增产和提升品质具有重要作用，也是强化动植物锌营养，保障人体健康的有益途径。然而，锌肥的应用仍存在养分退化、利用率低、作用机理不明等问题，因此对未来锌肥的发展提出以下建议：

一是推进锌肥产品的创新研发。针对石灰性土壤锌肥的吸附固定及含锌复合肥中由于物质反应造成的养分退化问题，进一步加强新型锌复合物质的研发及新型造粒和添加技术的创新，保障锌肥的有效应用。

二是建立匹配地区-作物-土壤-肥料的锌肥数据库。根据不同地区气候状况、作物自身抗性、土壤质地及养分含量状况、肥料的理化性质，推荐最适宜的锌肥施用量及施用方式，减少由于锌肥不当施用带来的负面效果。

三是加强锌肥增效机理的研究。目前关于锌肥的应用多集中于效果验证方面，要深入研究不同锌肥施用下产生不同效果的机理及养分的交互作用机制，明确不同锌肥的增效机制，为进一步应用新型锌肥提供理论依据。